

## PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11)Publication number : 2001-311847

(43)Date of publication of application : 09.11.2001

(51)Int.Cl. G02B 6/13  
G02B 5/18

(21)Application number : 2001-045121

(71)Applicant : NEC CORP

(22)Date of filing : 21.02.2001

(72)Inventor : KOUDA HIKARI  
URINO YUTAKA

(30)Priority

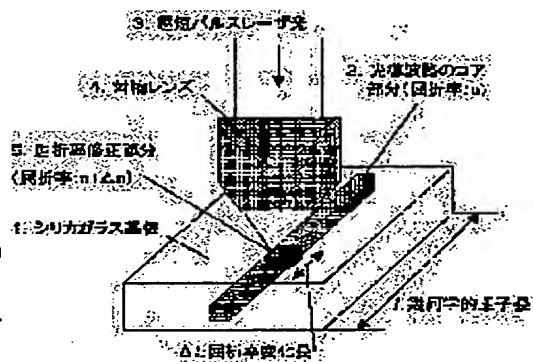
Priority number : 2000044298 Priority date : 22.02.2000 Priority country : JP

## (54) METHOD AND DEVICE FOR CORRECTING REFRACTIVE INDEX, AND OPTICAL WAVEGUIDE DEVICE

## (57)Abstract:

PROBLEM TO BE SOLVED: To provide a method for correcting a refractive index for improving a device characteristic by accurately correcting the refractive index of the core part of an optical waveguide device, and also for manufacturing an optical waveguide device with long term reliability.

SOLUTION: This is a method for correcting a refractive index of an optical waveguide, and ultra-short laser light 3, to be oscillated from Ti: sapphire laser, of a 150 femto-second pulse width, 0.7 J pulse energy, a 200 kHz pulse repetition frequency, and a 800 nm wavelength is converged into a 5.5 μm width about the same as a core width of an optical waveguide using an object lens 4 with a 20x magnification, and the core of a geometric length of ΔL is scanned with the beam along the core with a speed of 0.1 mm/s. As a result of the scanning with the laser light by 1 mm, Δn has changed by 16.7 nm. Moreover, it has been found out that 2 mm scanning results in 32.4 nm change, and thereafter, Δn changes by 16.7 nm per 1 mm increase in the scanning length, and Δn has changed by 0.0016 in both of TE and TM modes.



## LEGAL STATUS

[Date of request for examination] 21.02.2001

[Date of sending the examiner's decision of rejection]

[Kind of final disposal of application other than the examiner's decision of rejection or application converted registration]

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号  
特開2001-311847  
(P 2 0 0 1 - 3 1 1 8 4 7 A)  
(43) 公開日 平成13年11月9日 (2001. 11. 9)

(51) Int. Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テーマコード (参考)
G02B 6/13		G02B 5/18	
5/18		6/12	M

審査請求 有 請求項の数26 O L (全16頁)

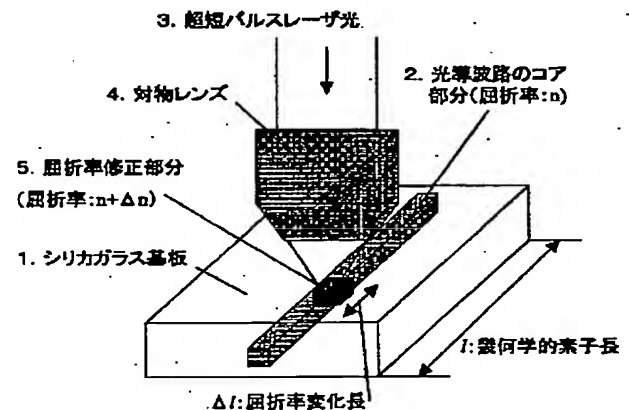
(21) 出願番号	特願2001-45121 (P 2001-45121)	(71) 出願人	000004237 日本電気株式会社 東京都港区芝五丁目7番1号
(22) 出願日	平成13年2月21日 (2001. 2. 21)	(72) 発明者	古宇田 光 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社社内
(31) 優先権主張番号	特願2000-44298 (P 2000-44298)	(72) 発明者	賣野 豊 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社社内
(32) 優先日	平成12年2月22日 (2000. 2. 22)	(74) 代理人	100096231 弁理士 稲垣 清
(33) 優先権主張国	日本 (J P)		

(54) 【発明の名称】 屈折率の修正方法、屈折率の修正装置、及び光導波路デバイス

(57) 【要約】

【課題】 光導波路デバイスのコア部分の屈折率を高精度で修正してデバイス特性を向上させ、また、長期信頼性のある光導波路デバイスを作製するための、屈折率の修正方法を提供する。

【解決手段】 本屈折率の修正方法は、光導波路デバイスの屈折率を修正する方法であって、干渉系となっている導波路のコア部分に、Ti:サファイヤレーザから発振される、パルス幅150フェムト秒、パルスエネルギー0.7μJ、パルス繰り返し周波数200kHz、波長800nmの超短パルスレーザ光3を、20倍の対物レンズ4を用いて光導波路のコアの幅とほぼ同じ5.5μmの幅で集光し、コアに沿って幾何学長ΔLの長さを0.1mm/sで走査した。レーザ光を1mm走査した結果、Δλは16.7nm変化した。また、2mm走査した場合は32.4nm、以降、走査距離が1mm増えると、Δλは16.7nm変化していき、ΔnはTEモード、TMモードとも0.0016変化していることがわかった。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 光導波路デバイスの屈折率を修正する方法であって、

30ピコ秒以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光を光導波路デバイスのコア部分、及びクラッド部分の少なくとも一方に照射して、照射した部分の屈折率を変化させることを特徴とする屈折率の修正方法。

【請求項 2】 照射する超短パルスレーザ光の光子のエネルギーが、光導波路デバイスを形成するクラッド材料のバンドギャップエネルギーの  $1/2$  よりも低いことを

特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 3】 屈折率を修正するための超短パルスレーザ光を照射する方法として、コア近傍を含むコア部分、コア部分のみ、及びコアの一部分のいずれかにレーザ光を集光し、クラッドの部分の屈折率を変化させることなく、コア部分又はコア部分の一部だけの屈折率を変化させることを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 4】 屈折率を修正するための超短パルスレーザ光を照射する方法として、コア近傍を含むコア部分にレーザ光を集光し、コア近傍のクラッド部分の屈折率をコア部分の屈折率と共に変化させることを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 5】 超短パルスレーザ光を光導波路のコア部分に沿って、少なくとも 1 回以上走査しながら照射して、屈折率を修正することを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 6】 光導波路素子中の屈折率を修正するコア部分が、2 層以上積層されているか、3 次元で形成されている光導波路デバイスの屈折率の修正方法であって、超短パルスレーザ光を照射する方向から見て上部に形成されている光導波路のコア部分の屈折率を変化させることなく、下部に形成されているコア部分の屈折率を変化させることを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 7】 超短パルスレーザ光を照射した部分を高密度化することにより屈折率を上げることを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 8】 超短パルスレーザ光を照射した部分を低密度化させ、又は空孔を生じさせることにより屈折率を下げることを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 9】 屈折率を修正した後に、光導波路デバイスを熱処理することを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 10】 コア部分の屈折率の変化が飽和するパワー密度のレーザ光を照射することを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 11】 レーザ照射をしてコア部分の屈折率を変化させると同時に照射したレーザ光によりコア部分を

加熱することで、屈折率を変化させた後の熱処理を不要にすることを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 12】 レーザ光を照射する光導波路デバイスの表面の形状がフラットで無い場合、クラッド部分と同じ屈折率を持つ液体、又はゲル状の材料を表面に塗布し、さらにその上からレーザ光を透過する透明材料で覆って表面をフラットにしてからレーザ光を照射することを特徴とする請求項 1 に記載の屈折率の修正方法。

【請求項 13】 光導波路デバイスの屈折率の修正装置であって、

光導波路デバイスを保持して X、Y 及び Z 軸方向に可動するステージ部と、コア部分の屈折率を修正するために用いる 30ピコ秒以下のパルス幅のレーザ光を発生するレーザ装置部と、そのレーザ装置から発生する光を光導波路デバイスのコア部分に照射することができると光学系部とを備え、それら 3 部が、同じ筐体内に固定されており、

請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって光導波路デバイスの屈折率を修正する機能を有することを特徴とする光導波路デバイスの屈折率の修正装置。

【請求項 14】 屈折率を修正する光導波路デバイスの入出力端面に光ファイバーを結合し、光を導波させながら屈折率を修正するための超短パルスレーザ光を光導波路デバイスのコア部分に照射する機能と、

目的とするコア部分の屈折率変化量を得るために、光導波路デバイスからの出力値をレーザ光の照射条件にフィードバックする機能を有することを特徴とする請求項 13 に記載の光導波路デバイスの屈折率の修正装置。

【請求項 15】 請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって屈折率を修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 16】 光導波路デバイスのコアおよびクラッド部分が非晶質、もしくはポリマー分子で構成されており、このデバイスのコア部分の屈折率を請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 17】 シリコン基板上に製膜された厚さ  $100\mu\text{m}$  以下のガラス薄膜中に光導波路デバイスが形成されており、この光導波路のコア部分の屈折率を請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 18】 2 本以上の光導波路を有する光導波路デバイスにおいて、

光導波路の間隔が  $30\mu\text{m}$  以下であり、2 本以上の光導波路のコア部分の屈折率を請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 19】 ガラス系の材料を用いた光導波路デバイスにおいて、

光が導波するコア部分に  $\text{GeO}_2$  を含んでおらず、このコア部分の屈折率を請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 20】 請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって、光が伝搬するコア部分の形状をテーパ状に変化させたことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 21】 光導波路デバイスにおいて、コア中を伝搬している光を任意の方向に回折させるためのグレーティングを、請求項 1 から 12 のうちのいずれか 1 項に記載の屈折率の修正方法によって、コア中に形成したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 22】 ガラス光導波路デバイスにおいて、光が導波するコア部分が平面型導波路になっており、このコア部分には  $\text{GeO}_2$  のがドーブされており、この平面型のスラブ導波路に請求項 1 に記載の屈折率の修正方法で屈折率を変化させてチャンネル導波路を形成したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 23】 光導波路型方向性結合器を有する光導波路デバイスにおいて、信号光が伝搬する導波路と導波路型方向性結合器の光を結合させる部分のどちらか一方のコア部分の屈折率、両方のコア部分の屈折率、及び導波路間の屈折率のいずれかを請求項 1 に記載の屈折率の修正方法で変化させることで、結合比を調整したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 24】 請求項 1 の屈折率の修正方法によって屈折率を修正した光導波路デバイスであって、レーザ光を照射する光導波路デバイスの表面形状を凸面にしてレンズの役目を持たせて、照射したレーザ光が効率的にレーザ導波路のコア部分に集光するような表面を持つことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 25】 WDM 光通信に用いられる多重化された光を分波したり、分波された光を合波したりする機能をもつアレイウエイブガイドグレーティングを有する光導波路デバイスであって、所定の波長の光が所定の導波路に結合されるように請求項 1 の方法で導波路の屈折率を修正したことを特徴とする光導波路デバイス。

【請求項 26】 特定の波長を回折することのできるファイバグレーティングを有する光導波路デバイスであって、所定の波長の光が回折するように請求項 1 の方法でグレーティングの屈折率を調整したことを特徴とする、光導波路デバイス。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、光導波路デバイスの光が導波するコア部分、もしくはその周辺の屈折率を修正する方法、その修正装置と、その方法で屈折率を修正した光導波路デバイスに関するものである。尚、本発明において、光導波路デバイスとは、光ファイバデバイスも含むものとして示してあり、また、屈折率の修正とは、導波路デバイスの光が伝播する導波路部分、導波路を含む周辺部分、または導波路の一部の屈折率を変化させて、デバイス特性の修正および調整を行うことを示している。

【0002】

【従来の技術】 光通信デバイスは、光を伝搬させる手段として主に光導波路と光ファイバを用いている。どちらの場合も、相対的に屈折率の高いコア部分と、屈折率の低いクラッド部分を有しており、光は屈折率の高いコア部分を導波する。光導波路の場合、コアとクラッドの境界の屈折率が急峻に変化しているタイプをステップ型、徐々に変化しているタイプをグレーデッド型と呼んでいる。

【0003】 代表的なステップ型の光導波路の作製方法としては、シリカ系のガラス基板上に  $\text{GeO}_2$  等をドーブした膜を形成し、リソグラフとエッチングプロセスで  $\text{GeO}_2$  ドープ層をリッジ型とし、この上に再度シリカ系のガラスを製膜して、埋め込み型の光導波路を得る方法がある。また、シリコン基板上にシリカガラスおよび  $\text{GeO}_2$  を含むシリカ系のガラスを積層し、リソグラフとエッチングプロセスでコア部分が表面にあるリッジ型導波路、もしくはコアが内部にある埋め込み型導波路が形成されている。

【0004】 近年、高分子材料を用いたポリマー系の光導波路も開発されており、屈折率の異なる膜を製膜して、ガラス系の光導波路と同様のプロセスにより平面型の光導波路が形成されている（例えば特開平 10-268152 号公報）。また、ガラスにイオンを拡散させ、拡散させた部分の屈折率を上昇させて、その部分をグレーデッド型の光導波路として応用することができる。例えばガラス基板内部の  $\text{Na}^+$  を  $\text{Ag}^+$  と交換することで屈折率を向上させ、光導波路を作製する方法も行われている。光ファイバの場合は、コア材料に  $\text{GeO}_2$  がドーブされたシリカガラス、クラッドはシリカガラスのものが、一般的に使用されている。また、プラスチックの重合度を変化させることでコアを形成した、プラスチックファイバも作製されている。

【0005】 近年、新しい導波路の形成方法として、ガラス基板中にピークパワーが  $10\text{ W/cm}^2$  以上、繰り返し周波数  $10\text{ kHz}$  以上で、基板に対して透明な波長のパルスレーザ光線を集光して走査することで、レーザビームが集光された部分の屈折率を連続的に変化させ、ガラス基板内部に直接光導波路を形成できることが報告されている（特開平 09-311237 号公報）。

【0006】以上に述べたような光導波路、光ファイバーを用いた光導波路デバイスの通信容量を拡大するため、一本の光導波路中に多波長の光を導波させ、その中から特定の波長だけを選択するアレイウエイブガイドグレーティングや干渉フィルター、各波長を分離する波長分波器や方向性結合器等が開発されている。これらの光導波路デバイスは、光の干渉や回折の効果を利用するため、光導波路の厳密な屈折率の制御が必要となる。しかし、前述した光導波路の作製方法では、目的とする光導波路デバイスの性能を得るために十分な屈折率の制御を

【0007】そこで、目的とする光導波路デバイスの仕様を満たすために、エキシマレーザによる、紫外レーザ光を光導波路の光が伝搬するコア部分に照射し、屈折率を上昇させて修正する方法が用いられている（例えば特開2000-162453号公報）。この方法で屈折率が修正できるのは、光が導波するコア部分のシリカガラス中に酸化ゲルマニウム（ $\text{GeO}_2$ ）がドーピングされている場合に限定されている。その理由は、ガラス中のGeイオンが関連する $\text{GeE}'$ センターの生成、またはGeに

【0008】

【発明が解決しようとする課題】紫外エキシマレーザ光を用いて、 $\text{GeO}_2$  ドーピングのシリカガラス光導波路の屈折率を修正する方法は、いくつかの問題点を持っている。第1の問題点は、屈折率を変化させるために長時間を要することである。例えば、高出力の紫外光発生レーザであるArFエキシマレーザを用いても、屈折率を0.001変化させるために約20分の時間を要してしまうことである。第2の問題点は、長時間紫外レーザ光を照射しても、導波路材料のアブレーションしきい値以下のパワー密度のレーザ光で照射しなければならないため、最大でも屈折率を0.001程度しか変化させることができないことである。そのため、屈折率を大きく修正したい場合は、紫外光の照射では対応することが非常に困難である。

【0009】第3の問題点は、屈折率の変化に伴い紫外線で生じた電子がGeに関連する欠陥にトラップされ、修正後の光導波路デバイスを高温にすると、このトラップされていた電子が欠陥から放出し、屈折率が徐々に修正前の屈折率に戻ってしまうことである。つまり、屈折率を修正した部分は熱的に不安定であり、屈折率を修正した後の光導波路デバイスは高温プロセスを行うことはできない。また、温度変動に対する信頼性が低い。第4の問題点は、屈折率を変化させるためには、ガラスに $\text{GeO}_2$  をドーピングすることが不可欠なことである。そのため、 $\text{GeO}_2$  を含まないガラスで作製した光導波路や、その他の導波路、光ファイバーは、紫外光を

照射しても屈折率の修正を行うことはできず、有効な手段が発明されていなかった。

【0010】第5の問題点は、紫外レーザ光源にエキシマレーザ光を用いた場合、集光性が悪いために、屈折率を変化させたい導波路のコア部分の幅である $5 \sim 10 \mu\text{m}$ 程度までビームを絞ることが出来ないことである。そのため、修正が必要な部分だけに光が照射されるようなマスクを設ける等の手段を取る必要がある。しかし、光導波路デバイスの導波路間隔が $30 \mu\text{m}$ よりも狭い場合には、マスクを用いても各導波路を個別に修正することは非常に困難である。

【0011】第6の問題点は、エキシマレーザを紫外光の光源に用いた場合、レーザ光を発生するためのガス交換が必要となるためランニングコストが高く、また、装置も高価であり、大型なため設置面積が大きい等の課題がある。エキシマレーザ以外で、屈折率を変化させるための紫外レーザ光源としてはNd:YAGレーザの発生する $1064 \text{ nm}$ の光の第4高調波である $266 \text{ nm}$ が考えられるが、 $266 \text{ nm}$ では屈折率を変化させるための $\text{GeE}'$ が生成する確率が非常に小さいため、レーザ光をコア部分に集光しても、屈折率の変化に非常に長時間を必要とするため、実用的で無い。

【0012】第7の問題点は、エキシマレーザを照射して $\text{GeO}_2$  をドーピングしたガラスの屈折率を変化させる際に、レーザ光の一部はガラスに吸収されてしまうため、温度が上昇してしまうことである。温度が上昇すると、ガラスの屈折率が増加してしまうため、修正や調整した後のデバイス特性を測定するためにはデバイスの温度を常温まで冷却する必要があった。そのため、修正や調整しながらその場でデバイス特性を測定することができなかった。

【0013】本発明の目的は、光導波路デバイスのコア部分の屈折率を高精度で修正してデバイス特性を向上させ、また、長期信頼性のある光導波路デバイスを作製するための、屈折率の修正方法、屈折率の修正装置、また、これらの方法で屈折率を修正した高性能な光導波路デバイスを提供するものである。

【0014】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するために、本発明に係る光導波路デバイスの屈折率の修正方法は、光導波路デバイスの屈折率を修正する方法であって、30ピコ秒以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光を光導波路デバイスのコア部分、及びクラッド部分の少なくとも一方に照射して、照射した部分の屈折率を変化させることを特徴としている。

【0015】従来の技術で形成された光導波路デバイスのコア部分を含む領域に、パルス幅が30ピコ秒以下の超短パルスレーザ光を照射するとエネルギー密度が高いために多光子吸収が生じ、光のエネルギーははじめに電子に吸収される。その後、熱電子から格子に熱エネルギー

一が移動し、物質は加熱される。パルス幅が30ピコ以下の場合、殆どの材料において、熱電子のエネルギーが格子に全て移動する前か、移動してもその直後にパルスの照射は終わってしまう。そのため、電子温度と格子温度が平衡になることは無い。この場合、レーザ光のエネルギーは光を集光した部分以外への拡散が抑制され、集光した部分を局所的に加熱することが可能となる。

【0016】局所的な領域に吸収された光のエネルギー密度がコア物質を構成する材料を変質させるしきい値を越えると、コア物質を構成している原子、分子の結合状態が変化し、気化、融解、変質、熱膨張等が生じる。そうすると、この局所的な領域の内部圧力が急峻に上昇する。その後、コア物質が冷却し、構造が再編成される場合は、照射前の状態よりも高密度化される。高密度化が生じると、屈折率は上昇する。この場合、高密度化される部分の周辺は低密度化されるが広く分散するため、屈折率の変化量は非常に小さく考慮する必要は無い。

【0017】また、集光部分のレーザ光のパワー密度がコア物質のアブレーションしきい値を大きく越えた場合は、レーザ光を集光した中心部分にあった物質は周囲の物質中に潜り込み、中心部分は低密度化される。さらにエネルギーが高くなると、中心部分は空孔となる。低密度化された場合の屈折率は下がり、空孔の場合は1.0となる。低密度化、もしくは空孔の周囲には高密度化される部分があるが、広く分散するため屈折率の変化量は小さく、考慮する必要は無い。

【0018】以上のような原理により、高密度化、および低密度化された屈折率の変化量は、パルスレーザ光のエネルギー、パルス繰り返し周波数、照射時間、パルス数、スキャン速度等を制御することで可能となる。光導波路のコア部分の変質しきい値は、コア物質の種類によって異なる。また、レーザ照射条件を制御することで、屈折率を変化させると同時に発生する熱により熱処理を兼ねることが可能であり、屈折率変化時に生じる熱に対して不安定なカラーセンターをこの熱により除去することが可能である。

【0019】30ピコ以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザで光導波路デバイスの屈折率を変化させるために照射するレーザ光のエネルギーは、クラッド材料へのレーザ光の吸収を防ぐため、クラッド材料のバンドギャップエネルギーよりも小さくする必要がある。しかしレーザ光のエネルギーがバンドギャップエネルギーより小さくても、エネルギー密度が高いと多光子吸収が生じ、表面がアブレーションしてしまう場合がある。そこで、光のエネルギーをクラッド材料のバンドギャップエネルギーの1/3以下にして、3光子過程でなければ吸収は生じないようにする。

【0020】その結果、超短パルスレーザを集光してデバイスに照射する際に、表面でのアブレーションを抑制し、デバイス中で光が集光されたコアの領域だけに多光

子吸収を生じさせて屈折率を変化させることが可能となる。また、レーザ光のパワーを調整することで、屈折率の変化する領域のサイズを制御することが容易となる。

【0021】30ピコ秒以下のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光をGeO<sub>2</sub> ドープガラスで形成されたコア部分に照射すると、多光子吸収の効果でArFやKrFエキシマレーザの193nm、248nmの波長の光を照射した場合と同じGeに関連したガラスの構造変化により屈折率を変化させることができる。

10 【0022】超短パルスレーザの場合は、エキシマレーザとは違ってビームを集光することができるため、コア部分に沿ってレーザビームを操作することが可能となるため、マスクプロセス等が不要となる。また、エネルギー密度の高い照射がコア部分だけに出来るので、屈折率の変化を飽和させることができる。屈折率変化が飽和するエネルギー密度以上のパルスレーザ光を照射すれば、屈折率を変化させる導波路コアの長さを変化させることで導波路の光路長の厳密な制御が可能となる。また、照射と同時に熱処理もできるため、エキシマレーザ修正の熱による屈折率変化の問題も解決され、信頼性の高い屈折率の修正、および調整を行うことが可能となる。

20 【0023】パルスレーザ光に強度プロファイルがガウシアンライクのビームを用いると、光の回折程度まで集光でき、屈折率を変化させる部分は回折限界以下にすることも可能となる。そのため、導波路間隔が30μm以下の場合でも、各導波路を1本ずつ修正することが可能となる。

【0024】本発明で屈折率を修正した部分には、導波路コアの材料によっては紫外レーザ光を照射した場合と同じようなカラーセンターの影響で屈折率が変化する可能性がある。しかし、カラーセンターが残存していても素子を熱処理することで、カラーセンターにトラップされていた電子は価電子帯に戻るため、カラーセンターによる屈折率変化の影響は無くなる。そして高密度化、低密度化、もしくは空孔により修正された屈折率の変化だけが残る。そのため、本発明で修正した光導波路デバイスを熱処理することで、信頼性を高めることが可能となる。

40 【0025】屈折率を修正するための装置として必要である、超短パルスレーザを発生させるレーザ発振部、そのレーザ光を試料まで導く光学系部、および光導波路デバイスを保持およびX、Y、Z方向に移動させるためのステージ部を同じ筐体の中に固定すると、外部の振動の影響を受けずに、パルスレーザ光を光導波路デバイスの所定のコア部分に照射することが可能となる。また、光導波路デバイスにあらかじめ光ファイバーを結合し、光を伝搬させてデバイス特性をモニターしながら屈折率の修正を行い、最適値からのずれを検知してパルスレーザ光の照射条件にフィードバックすることで、屈折率の変化量を仕様値に厳密に調整することが可能となる。

【0026】本発明に係る光導波路デバイスの屈折率の修正方法は、光導波路デバイスの屈折率の修正装置であって、光導波路デバイスを保持してX、Y及びZ軸方向に可動するステージ部と、コア部分の屈折率を修正するために用いる30ピコ秒以下のパルス幅のレーザ光を発生するレーザ装置部と、そのレーザ装置から発生する光を光導波路デバイスのコア部分に照射することができる光学系部の3部が、同じ筐体内に固定されており、請求項1から12のうちのいずれか1項に記載の屈折率の修正方法によって光導波路デバイスの屈折率を修正する機能を有することを特徴としている。

【0027】30ピコ秒以下の超短パルスレーザ光を集光した部分を、クラックや欠陥を生じさせずに高密度化、低密度化、もしくは空孔を形成して屈折率を修正することができる材料としては、ガラス状の無定形物質、もしくは高分子有機材料であるポリマーが考えられる。高密度化、低密度化、または空孔が形成されたガラスは、ガラス転位点まで安定して存在する。例えばシリカガラス( $\text{SiO}_2$ )の軟化点は1500℃であるので、通常的光導波路デバイスの使用環境である、0℃~100℃の範囲では、屈折率は変動することは無い。そのため、温度変化に対するデバイスの信頼性が向上する。

【0028】また、高分子が重合しているポリマー材料の光導波路の場合は、パルス光の照射による高分子の重合度や、構造、組成等の変化により、屈折率が上下する。この場合の温度に対する屈折率の安定性はポリマーの組成や重合度に依存するが、ポリイミド系の材料の場合は200℃程度までは安定している。その他、半導体の材料等でも物質の状態が結晶では無く、アモルファス状態のコア材料であれば、本発明を適応することが可能となる。

【0029】シングルモードの光ファイバーのコア径は、クラッドとの屈折率差で決るが、現在使用されているものは7~10 $\mu\text{m}$ 程度である。この光ファイバーと光導波路デバイスをロス無く結合するためには、光導波路のコア径も光ファイバーと同程度にする必要がある。しかし、光導波路デバイスを集積化したり、光伝搬ロスを抑制したりするためには、コア径を小さくする方が望ましい場合がある。そこで、光導波路デバイスの入出力端面のコアを含むクラッド部分の屈折率を超短パルスレーザを用いて上昇させ、テーパ状のコアを入出力端面に形成することで、光ファイバーからの入出力を、ファイバーのコア径よりも細い光導波路デバイスのコアにロス無く、結合することが可能となる。

【0030】超短パルスレーザを用いて、光導波路のコア中に空孔を形成すれば、その部分の屈折率は1.0となるため、屈折率差が非常に大きい。そのため、この空孔をコア中に規則的に配列することで、回折効率の良いグレーティングを形成することが可能となる。空孔の形状は球状、楕円状、また、照射条件を調整することで、

棒状にすることも可能であり、この形状と配置を調整することで、回折させる光の波長や方向を制御することが可能となる。

【0031】シリカガラスのクラッド層に挟まれたシリカガラスにGeをドープした層である平面導波路に20ピコ秒以下のパルスレーザ光を走査することにより、走査した部分だけの屈折率を上昇させることができ、平面導波路からチャンネル導波路を形成することができる。平面導波路に導入された光が平面導波路内を伝播していくと、屈折率の高い部分に集まり、チャンネル導波路から出力させることが可能となる。

#### 【0032】

【発明の実施の形態】以下に、実施形態例を挙げ、添付図面を参照して、本発明の実施の形態を具体的かつ詳細に説明する。

<実施例1>本実施例は、請求項1の実施形態を具体的に図を用いて説明する。図1は、シリカガラス基板1のクラッド中に $\text{GeO}_2$ をドープして形成した光導波路のコア部分2を有する埋め込み型のマッハツェンダー型干渉系光導波路の干渉系となっている部分の一部を拡大した図である。コア部分の屈折率 $n$ は1.474である。まず、光源に1.55 $\mu\text{m}$ に中心波長を持つエルビウムドープファイバーのブロードな波長を持つ光を用い、このマッハツェンダー型干渉系の干渉波長の測定を行った。その結果、干渉する波長は1.56 $\mu\text{m}$ であることがわかった。

【0033】次に、干渉系となっている導波路のコア部分に、Ti:サファイヤレーザから発振される、パルス幅150フェムト秒、パルスエネルギー0.7 $\mu\text{J}$ 、パルス繰り返し周波数200kHz、波長800nmの超短パルスレーザ光3を、20倍の対物レンズ4を用いて光導波路のコアの幅とほぼ同じ5.5 $\mu\text{m}$ の幅で集光し、コアに沿って幾何学長 $\Delta L$ の長さを0.1mm/sで走査した。尚、走査は基板を動かすことにより行った。照射された部分の屈折率の変化の大きさ $\Delta n$ は、干渉波長の変化 $\Delta \lambda$ とレーザ光を走査して屈折率を調整した長さ $\Delta L$ により、式(1)で表される。

$$\Delta n = -(m+1/2) \Delta \lambda / \Delta L \quad (1)$$

$m$ は干渉系がもともと持っていた光路差であり、 $m=95$ の導波路で評価した。

【0034】レーザ光を1mm走査した結果、 $\Delta \lambda$ は16.7nm変化した。また、2mm走査した場合は32.4nm、以降、走査距離が1mm増えると、 $\Delta \lambda$ は16.7nm変化していき、式(1)より $\Delta n$ はTEモード、TMモードとも0.0016変化していることがわかった。このように、パルスエネルギーを一定にして走査距離を変えることで、所定の長さだけ光路長を調整することが可能であった。また、パルスエネルギーを変化させて同じ実験を試みたところ、パワーを0.7~2 $\mu\text{J}$ 程度にすれば、変化する屈折率の大きさは変わらない



いことがわかり、屈折率の変化は飽和していることがわかった。

【0035】パルスの繰り返し周波数を80MHzにしてパルスエネルギーを1.8nJとし、他は同じ条件で実験を試みたところ、走査距離あたりの光路長の変化は12nm/mmとなった。そこで、80MHzでパルスエネルギーを2.5nJにしたところ、16nm/mmとなり、200kHzの場合とほぼ同じ結果が得られた。

【0036】修正した素子を300℃に加熱し、24時間保持した後、常温に冷却し、再度光路長を測定したところ、熱処理前と変化していないことがわかり、熱処理しても屈折率は変化しないことがわかった。この結果、屈折率の修正と同時に熱処理も行われていることが確認された。

【0037】また、別途、直線導波路を用いて上記修正で用いたのと同じ条件でレーザ光を照射し、照射前後でのロスの変化を測定する実験を試みたところ、ロスの変化はなかった。導波路のコア部分の周囲も屈折率が変化している場合には、光が導波路から漏れたり、導波路の伝播損失が増えるためロスは増加することが予想されたが、ロスがなかったことにより、屈折率の修正されている部分は導波路のコア部分だけであることがわかった。

【0038】＜比較例1＞実施例1と同じ実験構成により、レーザ光のパルス幅を50ピコ秒に変化させて他は同じ条件で屈折率の修正を試みた。その結果、干渉波長は変化しておらず、集光したコア部分の屈折率は変化していないことがわかった。そこで、レーザ光のパルスエネルギーを0.7μJから徐々に上昇させたところ、5.0μJの時に集光した部分は、屈折率が変化する前に誘電破壊が生じてしまった。

【0039】＜実施例2＞請求項2の実施形態を具体的に図を用いて説明する。シリカガラス光導波路のクラッド材料に使用されるシリカガラスと、コア材料に使用されるGeO<sub>2</sub>をドープしたシリカガラスのバンドギャップを吸収スペクトルにより測定した結果を図2に示す。シリカガラスのバンドギャップ6のエネルギーは7.55eVであった。また、GeO<sub>2</sub>ドープのシリカガラスのバンドギャップ7は7.13eVであった。また、シリカガラスは5eV付近に欠陥バンド8が存在していることがわかった。

【0040】実施例1で用いたパルスレーザ光の波長は800nmであり、光子のエネルギーは1.55eVである。そのため、図2中に示すように、価電子帯9から2光子過程では光の吸収は生じず、3光子過程で欠陥バンドに到達するため、光のエネルギーが吸収された。3光子吸収は超短パルスレーザ光を集光して高エネルギー密度になった部分だけに生じるため、焦点から焦点のビーム径程度の領域だけの屈折率が変化した。

【0041】次に、実施例1に於いて用いた超短パルス

レーザ光の800nm光の第二高調波である400nmの光を非線形光学素子で発生させ、パルスエネルギーは0.7μJとして、実施例1と同じ条件で実験を試みた。図2より、400nmの光の光子エネルギーは3.11eVであり、3光子吸収でバンドギャップに到達し、2光子吸収でも欠陥バンド8に吸収が生じることがわかった。実験の結果、この3光子吸収および2光子吸収は800nmの実験と同様レーザ光の集光点近傍にしか生じないため、この部分だけの屈折率が変化する

ことがわかった。

【0042】400nmの光では、800nmの光と比較してエネルギーが吸収されやすいため光路長の走査距離あたりの変化量は24nm/mm、屈折率変化Δnは0.0024となり、800nmの場合の約1.5倍であった。150フェムト秒のパルス光を発生するチタンサファイヤレーザは、波長を700～1000nmまで可変で発生することが可能である。この光の第2、第3高調波により、233～500nmの光を得ることができる。そこで、実施例1と同じ実験を、波長を短波長に徐々に変化させて調べたところ、クラッドのバンドギャップの1/2である、3.56eV以下のエネルギーの光であれば、2光子吸収が生じてもしリカガラスのバンドギャップを越えず、集光点近傍だけに3光子吸収、もしくは欠陥への2光子吸収によりレーザ光のエネルギーを吸収させて、屈折率を変化させることができた。

【0043】＜比較例2＞実施例1で用いた800nmの超短パルスレーザ光と、その第2高調波である400nmの光混合を非線形光学素子で行い、800nmの第3高調波となる266nmを得た。この波長の150フェムト秒のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光を用いて、実施例1と同じ実験を試みた。パルスエネルギーは0.1μJとした。その結果、図2に示すように266nmの光の光子エネルギーは4.68eVであり、2光子吸収でシリカガラスのバンドギャップ6を超え、また、1光子でも欠陥バンドによる吸収が生じた。

【0044】そのためレーザ光は集光点近傍だけではなく、光導波路デバイス中の光路全体に吸収されてしまい、集光点近傍だけの屈折率の変化を生じさせることが出来なかった。そこで、パルスエネルギーを上昇させていったところ、1.0μJに達したところで集光部分に誘電破壊が生じてしまった。また、400nmの第2高調波である200nmで同じ実験を試みたところ、図2に示すように光子エネルギーは6.23eVとなり、1光子で欠陥バンドによる吸収、2光子ではバンドギャップを超えてしまうため、レーザ光が透過した光路全体に光が吸収されてしまい266nmの場合と同様に集光点近傍の領域の屈折率を変化させることが出来なかった。

【0045】＜実施例3＞請求項3の実施形態を具体的に図を用いて説明する。図3にはシリカガラス基板1のクラッド中に、GeO<sub>2</sub>をドープした光導波路のコア2



が形成してある、光導波路デバイスの断面図を示す。コアの断面は  $7\ \mu\text{m}$  角である。屈折率修正部分 5 を、集光した超短パルスレーザの光路 1 0 とともに図 3 に示す。5 0 倍の対物レンズで集光した  $800\ \text{nm}$  の波長の超短パルスレーザ光 1 1 による屈折率の修正領域はコア部分だけであり、クラッド部分は変化していないことがわかった。

【0046】そこで、100 倍の対物レンズで集光した  $800\ \text{nm}$  の波長の超短パルスレーザ光 1 2 で修正したところ、図 3 のようにコア中の 1 部分だけの屈折率を変化させることができた。この、コアの一部を修正した導波路から出射される導波光の透過ロス は 1 % 以内であり、屈折率の変化量  $\Delta n$  は 0. 0 1 となった。実施例 1 よりも屈折率が上昇したのは、コア中のパルスレーザ光のエネルギー密度が高くなったため、高密度化による屈折率の変化が得られたためである。波長を変化させて、同じ実験を試みたところ、 $355\sim1000\ \text{nm}$  の波長の範囲では、レーザ光のパルスエネルギーを調整することで、コア部分だけ、もしくはコア部分の一部だけのガラスの屈折率を変化させることが可能であった。

【0047】＜比較例 3＞実施例 3 と同じ実験で、5 0 倍の対物レンズで集光した  $266\ \text{nm}$  の波長の超短パルスレーザ光 1 3 を用いて行った。その結果、レーザ光の吸収する領域 1 4 は、デバイス中を透過する超短パルスレーザ光の光路全体となるため、集光した部分だけにエネルギーを集中させることができず、コア部分の屈折率を変化させることが出来なかった。波長を変化させて実験を行ったところ、 $190\sim355\ \text{nm}$  の範囲の波長では、 $266\ \text{nm}$  の場合と同じように光路全体に光が吸収されてしまい、屈折率を変化させることができなかった。

【0048】＜実施例 4＞請求項 4 の実施形態を具体的に図を用いて説明する。図 4 にはシリカガラス基板 1 のクラッド中に、 $\text{GeO}_2$  をドーピングした光導波路のコア 2 が形成してある、光導波路デバイスの断面図を示す。コアの断面は  $7\ \mu\text{m}$  角である。実施例 1 と同じ実験構成およびレーザ条件で、パルスパワーを  $2.5\ \mu\text{J}$  に調整して、20 倍の対物レンズで集光した  $800\ \text{nm}$  の波長の超短パルスレーザ光 1 5 による屈折率の修正領域は、コア部分の周囲を含む縦  $15\ \mu\text{m}$ 、横  $10\ \mu\text{m}$  の楕円体領域であった。この、コアの周囲を含む領域を修正した導波路から出射される導波光の透過ロス は 2 % 以内であり、屈折率の変化量は 0. 0 1 となり、実施例 3 で示したコアだけを修正した場合と同程度であった。

【0049】＜実施例 5＞請求項 5 の実施形態を、具体的に図を用いて説明する。実施例 1 では、パルスレーザ光を導波路に沿って走査する距離により、屈折率の変化量を調整して光路長を制御する方法を示した。屈折率が飽和する前のパルスエネルギーでは、同じコア部分を 2 回走査することでも、屈折率をさらに上昇させることが

可能であった。図 5 に、実施例 1 の条件でパルスエネルギーを  $0.5\ \mu\text{J}$  とした場合の屈折率の修正を行った際の走査距離と走査回数による、光路長の変化を示す。

【0050】走査回数が増す度に屈折率は増加していったが、4 回目の走査では屈折率の変化に飽和が見られた。この図のように、走査距離および走査回数を制御することで、光導波路の光路長を厳密に制御できることがわかった。尚、この実験では導波路に含まれる Ge 濃度が実施例 1 とは違うため、 $\Delta n$  の変化量は実施例 1 とは異なっている。

【0051】＜実施例 6＞請求項 6 の実施形態を、図を用いて説明する。図 6 に 3 層に積層された光導波路デバイス 1 6 の断面図を示す。クラッドはシリカガラス基板 1、コア部分 2 は  $\text{GeO}_2$  をドーピングしたシリカガラスで形成されている。コア部分の断面は  $7\times7\ \mu\text{m}$  角であり、各導波路は  $20\ \mu\text{m}$  間隔で形成されている。実施例 1 と同じ条件で集光レンズに 5 0 倍の対物レンズ 4 を用いて  $150$  フェムト秒のパルス幅を持つ超短パルスレーザ光 3 の焦点を、最下層のコアに沿って  $1\ \text{mm/s}$  で  $1\ \text{mm}$  の距離を走査した。その結果、レーザ光が透過する第 1、2 層目のコア部分の屈折率は変化せず、第 3 層目のコア部分 5 の屈折率だけを実施例 1 と同様に修正することができた。

【0052】＜実施例 7＞請求項 7 の実施形態を、図を用いて説明する。実施例 4 において、超短パルスレーザを照射して屈折率を修正したコア部分のラマンスペクトルを顕微分光で測定したところ、シリカガラスが 3 % 高密度化された場合に観測されるピークのシフトが見られた。この結果、屈折率の変化は、シリカガラスの高密度化により生じていることがわかった。図 7 に、高密度化により屈折率が変化した光導波路のコア部分 1 7 を示す。

【0053】＜実施例 8＞実施例 1 と同じ光導波路デバイスの屈折率の修正に、Ti : サファイヤレーザから発振される、パルス幅  $150$  フェムト秒、パルスエネルギー  $2.5\ \mu\text{J}$ 、パルス繰り返し周波数  $1\ \text{kHz}$ 、波長  $400\ \text{nm}$  の光を用いた。ビームはスキャンせず、100 倍の対物レンズで集光した波長  $400\ \text{nm}$  の超短パルスレーザ光 1 8 を、光導波路のコアの中心に集光点ができるようにして 1 発照射した。その結果、図 8 に示すように、直径約  $300\ \text{nm}$  の球状の空孔 1 9 がコア中に形成された。

【0054】また同じ条件で、20 倍の対物レンズで集光した  $400\ \text{nm}$  の波長の超短パルスレーザ光 2 0 を用いて実験を試みたところ、幅  $250\ \text{nm}$  で長さがちょうどコア部分を貫通する  $7\ \mu\text{m}$  となる円柱形の空孔 2 1 が形成された。屈折率を修正した部分まで試料を研磨し、原子間力顕微鏡で表面を観察したところ、修正した部分は中空となっていることが確かめられ、修正部分の屈折率は 1. 0 であることがわかった。修正後の光導波

10

20

30

40

50

路の透過ロス調べたところ、修正前と比較して殆ど変化していないことがわかった。

【0055】<実施例9>シリカガラスにゲルマニウムをドーブしてある光導波路のコア部分に、実施例8と同様の超短パルスレーザー光を100倍の対物レンズで集光して照射したところ、空孔の周辺に欠陥が生じ、図9に示すようにコア材料のバンドギャップ22の中に、欠陥バンド23が新たに形成されることが、スペクトル測定の結果わかった。この欠陥バンド23には、400nmの光の3光子吸収24で生成した自由電子25がトラップされる場合があり、このトラップされた電子26は、屈折率変化を起こすことがわかった。

【0056】しかし、屈折率修正後に、デバイスを200℃で1時間加熱することにより、トラップされた電子は価電子帯に緩和した。図中に熱処理で緩和した電子27を示す。この熱処理によりカラーセンターによる屈折率変化はなくなり、コア材料の密度変化による屈折率変化だけとなることがわかった。熱処理後の光導波路デバイスは温度変化に対する信頼性が良く、0~100℃の範囲ではデバイス特性が変化することはなかった。

【0057】<実施例10>請求項13の実施形態を、図を用いて説明する。光導波路デバイス28を保持するx、y、z可動ステージ部29と、30ピコ秒以下のパルス光を発生することのできるパルスレーザー装置部30と、そのレーザー光から発生する光を光導波路デバイスのコアの部分に照射することのできる集光光学系部31の3部が一つの筐体32内に固定されている屈折率修正装置33を図10に示す。ステージ部29はx、y、zの各方位に±0.1μm以上の精度で最高100mm/sの速度で可動する。また、光学系は、請求項1~12の屈折率の修正方法に必要な超短パルスの集光照射が可能である。

【0058】各部分が同一の筐体に固定されているため、外部の振動の影響を受けにくく、目的とする導波路のコア部分に沿って、正確にレーザービームを走査することが可能であった。この装置で屈折率を修正した後の光導波路の光伝播ロスが0.05dBであり、修正前と比べて殆ど変化しなかった。

【0059】<実施例11>請求項14の実施形態を、図を用いて説明する。図11に、シリカガラス基板1のクラッドと、シリカガラスにGeO<sub>2</sub>がドーブされた幅7μmのコア部分2で光導波路が形成された、マッハツェンダー型の干渉フィルター34を示す。このフィルターは1本のファイバ中に存在する多波長の光を、各干渉計で強度が強くなる波長だけが分岐して各導波路から出力される。各干渉計の光路長を所定の光が干渉するように、図10の屈折率修正装置を用いて屈折率を修正する際に、光導波路デバイスの入出力面にあらかじめ光ファイバー35を結合させた。

【0060】そして多波長光源36から出射された1. 50

550~1.558μmで0.8nm間隔の計11種類の光を光ファイバーでデバイスに入力し、分岐した各干渉計からの出力を光スペクトルアナライザー37でモニターしながらレーザー光を照射した。照射条件は実施例1と同じとし、150フェムト秒のパルス幅を持つ超短パルスレーザー光3をコア部分に沿って0.1mm/sで走査した。また、パルスエネルギーは0.7μJとした。モニターした出力強度が最高値に達したら、走査およびレーザー光の照射が自動的に終了するように光スペクトルアナライザーの信号をレーザー光のシャッターにフィードバックシステムを設定した。

【0061】その結果、各導波路とも3秒以内で最適値に屈折率を修正することが可能となり、分岐した光導波路路からは所定の波長の光を出力させることができた。出力側の光導波路と光ファイバーの結合はオイルマッチングとすることで、容易に次に評価する光導波路と結合させることができ、11本全ての干渉計の屈折率を最適値に修正するために要した時間は約5分であった。分岐した各導波路から出力される光の強度の合計から光導波路損失を見積もったところ、0.1dB以下であり、損失が小さいことがわかった。

【0062】<実施例12>請求項16の実施形態を、図を用いて説明する。図12に、シリカガラス基板1上に製膜された屈折率が1.500のポリメタクリル酸メチル(PMMA)のポリマー薄膜38中にこのポリマーよりも屈折率が0.001大きなPMMA誘導体のポリマーにより7×7μmの導波路のコア39が形成されている、光導波路素子を示す。このコア部分に、実施例1と同様に150フェムト秒のレーザー光を同じように照射して0.1mm/sで1mm走査した。パルスエネルギーは0.02μJとした。その結果、コア部分のポリマーの重合率が変化して高密度化が生じ、屈折率の変化は0.001となり、屈折率を修正できることがわかった。

【0063】<実施例13>請求項17の実施形態を、図を用いて説明する。図13には、0.5mm厚のシリコン基板40上に製膜した厚さ20μmのシリカガラス薄膜41中にGeO<sub>2</sub>をドーブしたシリカガラスで5.5×5.5μmの導波路のコアが形成してある、光導波路デバイスである。この光導波路のコア部分2に実施例1と同様の超短パルスレーザー光3を20倍の対物レンズで集光、走査することで、実施例1と同様に屈折率を修正することができた。シリコン基板から5μm以上、上部に光導波路のコア部分が形成されていれば、シリコン基板にダメージを生じさせずにコア部分の屈折率を修正できることがわかった。

【0064】<実施例14>請求項18の実施形態を、図を用いて説明する。図14は、図13に示したシリコン上に製膜された厚さ約20μmのシリカガラス薄膜中に、Geをドーブしたシリカガラスにより幅5.5μm

の光導波路のコア 2 が形成された波長分波用光導波路デバイス 4 2 である。このデバイスは、1 本のファイバー中に伝搬する 1.540~1.5572  $\mu\text{m}$  で 0.8 nm 間隔の波長を持ったレーザ光 4 3 から 0.8 nm 間隔の各波長に分波された出力 4 4 を得ることが可能である。それぞれの導波路の間隔は、最も広い部分でも 20  $\mu\text{m}$  と非常に狭い。この分岐した各光導波路から所定の波長の光が最大出力となるように、屈折率の修正を実施例 1 と同じ条件のレーザを用い、実施例 11 で述べたフィードバック機能を有した屈折率修正装置を用いて、透

過光をモニターしながら修正を行った。  
【0065】屈折率の修正領域 4 5 の導波路間隔が 20  $\mu\text{m}$  以下でも、集光されるビームの直径は 20 倍の対物レンズを用いることで、導波路幅と同じ 5.5  $\mu\text{m}$  に調整できた。その結果、他の導波路に影響を与えることなく、各光導波路を所定の性能が得られる屈折率に調整することが可能であった。

【0066】＜実施例 15＞請求項 19 の実施形態を、図を用いて説明する。従来の技術で述べた、超短パルスレーザをガラス中で走査することにより形成された光導波路は、ガラス中に  $\text{GeO}_2$  をドーピングする必要がない。この方法でシリカガラス中に形成された光導波路デバイスを図 15 に示す。この超短パルスで直描された光導波路のコア部分 4 6 の屈折率を修正するために、実施例 3 と同様の実験を試みたところ、 $\text{GeO}_2$  をドーピングしたシリカガラスの場合と同様、屈折率の修正を行うことが可能であった。またレーザで直描した部分のレーザによる修正は、屈折率が変化する部分とのボリュームマッチングが非常に良く、屈折率の修正による導波光のロスは殆ど生じないことがわかった。

【0067】＜実施例 16＞請求項 20 の実施形態を、図を用いて説明する。図 16 は、図 13 に示したように、シリコン基板 40 上に製膜されたシリカガラス薄膜 41 中に  $\text{GeO}_2$  をドーピングして形成された、幾何学長 2

$$d = \lambda / (n \cdot 2 \sin 45^\circ) = 743 \text{ nm} \quad (2)$$

となる。

【0070】そこで、図 17 の下図に示す d の間隔を 743 nm に設定し、この面上に棒状の空孔を約 500 nm 間隔で形成した。そして 2 波長を入力したところ、1.550  $\mu\text{m}$  の光の入力に対し、15% がグレーティングにより垂直方向に回折して、分岐した導波路から射出された。透過した 1.300  $\mu\text{m}$  の透過ロスは 1% 以内であった。また、d の間隔を 623 nm にすることで、1.300  $\mu\text{m}$  の光を 90 回折させ、分岐した光導波路から出力することができ、この場合の回折効率も 15% であった。

【0071】図 18 は、シリコン基板 40 上のシリカガラス薄膜 41 中に  $\text{GeO}_2$  がドーピングされた光導波路のコア部分 2 が形成されている、光導波路の断面を横から見た図である。このコア中に、図 17 でグレーティングを

0 mm の光導波路のコア部分 2 を含む断面図である。コア部分は 5  $\mu\text{m}$  角に形成されている。図 3、4 で示したように、超短パルスレーザ 3 で屈折率を修正する領域は、集光レンズや入力するレーザパワーを調整することにより、コアの一部分やコアの周囲を含む領域に変化させることができる。そこで、光源には実施例 4 と同じレーザを用い、図 16 の光が入出力するコア端面部分から 20 倍の対物レンズで集光した光を照射し、レーザの平均パワーを 300 mW から 100 mW に変化させながら、0.1 mm/s で 10 mm の長さをスキャンした。

【0068】その結果、コア周囲を含む領域の屈折率が修正され、図 16 に示すように、入出力端面はコア径が 8  $\mu\text{m}$ 、修正した終端は径約 5  $\mu\text{m}$  で光導波路のコア径と一致した。このように、スポットサイズ変換光導波路 47 とした屈折率修正部分 4 に、コア径が 7  $\mu\text{m}$  の光ファイバーを結合し、伝搬ロスを測定したところ 0.1 dB 以下であった。この結果、入出力端面のコア部分をテーパ形状に修正することで、異なるコア径の光ファイバーと光導波路をロス無く接合することができることがわかった。

【0069】＜実施例 17＞請求項 21 の実施形態を、図を用いて説明する。図 17 は、シリコン基板上に形成したシリカガラス薄膜 41 中に  $\text{GeO}_2$  をドーピングした光導波路のコア部分 2 が T 字状に形成されているデバイスを上から見た図である。この T 字状の分岐部分に、実施例 8 で示した 1 kHz で 400 nm の超短パルスレーザを 20 倍の対物レンズで集光して形成した径 250 nm で長さ 7  $\mu\text{m}$  の円柱状の空孔を図 17 の下部に示したようにブラッグの条件を満たすように形成することを試みた。コア中の波長  $\lambda$  は  $\lambda/n$  となり、n はコアの屈折率で 1.475、入力する波長  $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$  は 1.550  $\mu\text{m}$  と 1.300  $\mu\text{m}$  であり、そのうち 1.550  $\mu\text{m}$  の波長だけを回折させるための d は式 (2) で計算され、

形成したときと同じ超短パルスレーザ 3 を斜め方向から照射し、45° 傾いた空孔を形成した。空孔の間隔は 1.550  $\mu\text{m}$  が回折されるように設定した。1.550  $\mu\text{m}$  と 1.300  $\mu\text{m}$  の光を伝搬させたところ、1.550  $\mu\text{m}$  の光の 10% がコア部分から上部方向に回折され、クラッドを通過してデバイスの表面に出力された。1.300  $\mu\text{m}$  の光は 1% 以内であった。

【0072】＜実施例 18＞請求項 12 の実施の形態を図で説明する。図 19 に示したように、シリコン基板 40 上のシリカガラス薄膜 41 中に  $\text{GeO}_2$  がドーピングされた光導波路のコア部分 2 が形成されている光導波路デバイスの表面が凸状に突起していたので、表面にクラッド材料と屈折率が同じシリコン樹脂 49 を表面に塗布した。その上から厚さ 50  $\mu\text{m}$  で屈折率がコア材料と同じカバーガラス 50 をかぶせた。その後、実施例 1 と同様

の超短パルスレーザー光 3 の照射実験を試みたところ、ビームは導波路の凸部分で方向が変わることなく導波路のコア部分に導入されて、コア部分の屈折率を 0.0016 変化させ、デバイス特性を修正することが可能となった。

【0073】＜実施例 19＞請求項 22 の実施の形態を図で説明する。図 20 に示したように、シリコン基板 49 上のシリカガラス薄膜 41 中に高濃度に  $\text{GeO}_2$  がドーピングされた平面導波路部分 51 が形成されている光導波路デバイスに、実施例 1 と同様の長短パルスレーザー光 3 を集光照射してスキャンしたところ、平面導波路でレーザが照射された部分の屈折率が 0.004 変化した。この変化した導波路部分はチャンネル導波路として使用できることがわかった。また、平面導波路の一方から入射された横幅の広い光は平面導波路を伝播中にチャンネル導波路に集光され、他方の端面からはチャンネル導波路から出射されることがわかった。このデバイスにレーザダイオードの光を入射することで、多チャンネルの導波路に出力を分配することができた。

【0074】＜実施例 20＞請求項 23 の実施の形態を図で説明する。図 21 に示したようにシリカガラス光導波路デバイス中に形成された導波路型方向性結合器 52 と主導波路 53 の結合部分を含む全体、もしくは一部に実施例 1 と同じ条件でレーザ光を照射して屈折率修正部分 4 とした。その結果、主導波路から方向性結合器に分岐する結合比率が変化することがわかった。レーザ光の照射パラメータを変化させることで、分岐比を制御することが可能であり、入力に対して所定の出力比が得られる導波路デバイスに調整できることがわかった。

【0075】＜実施例 21＞請求項目 24 の実施の形態を図で説明する。図 22 に示したように、シリコン基板 40 上の形成されたシリカガラス光導波路のコア部分 2 の上部は凸形状になることがある。この凸形状はデバイス形成後の熱処理の温度および時間を制御することで、所定の形状に成形されることがわかった。そこで、導波路コア部分の屈折率を修正するために照射する超短パルスレーザー光 3 のビームの集光位置が導波路のコアのほぼ中心になるように表面形状を制御した光導波路デバイス 53 を形成した。このデバイスにレーザ光を請求項 1 と同じ条件で照射したところ、コアにおけるビームのエネルギー密度が向上したため、屈折率の変化が表面がフラットな形状の場合と比較して約 20% 程度増加することがわかった。この例のように、表面形状を変化させることで同じレーザ光の照射条件でもコア部分に照射されるレーザ光のエネルギー密度を調整することが可能となり、屈折率の変化する大きさを調整することが可能であった。

【0076】

【発明の効果】本発明により、光導波路デバイスの光が導波するコア部分の屈折率を精度よく修正することが可

能となり、信頼性の高い、高性能な光導波路デバイスを製造することができる。本発明により屈折率が修正された光導波路デバイスを、光通信システムに応用することで、信頼性の高い大容量高速光通信が実現され、情報通信産業の発展に大きく貢献することができる。

【図面の簡単な説明】

【図 1】超短パルスレーザーによる光導波路デバイスのコア部分の屈折率の修正。

【図 2】シリカガラスおよび  $\text{Ge}$  をドーピングしたシリカガラスのバンドギャップと、各波長の光における吸収。

【図 3】超短パルスレーザーの波長と屈折率の変化する領域。

【図 4】コア周辺のクラッド部分を含んだ屈折率の修正。

【図 5】超短パルスレーザーの走査距離、走査回数と光路長の変化。

【図 6】3次元で形成された光導波路デバイスの下層のコア部分の屈折率の修正。

【図 7】高密度化による屈折率の修正。

【図 8】空孔による屈折率の修正。

【図 9】熱処理によるカラーセンターの緩和。

【図 10】レーザ発振器、集光光学系、試料ステージが一体となった、光導波路の屈折率修正装置。

【図 11】導波路デバイスの透過光強度を超短パルスレーザー光の照射パラメータにフィードバックさせた光導波路の屈折率修正装置。

【図 12】シリカガラス上に形成されたポリマー樹脂薄膜中の光導波路のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザー光で修正した光導波路デバイス。

【図 13】シリコン基板上に製膜されたシリカガラス中の  $\text{Ge}$  がドーピングされた光導波路のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザー光で修正した光導波路デバイス。

【図 14】導波路間隔が  $20\mu\text{m}$  以下のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザー光で個別に修正した光導波路デバイス。

【図 15】超短パルスレーザーで直描した光導波路のコア部分の屈折率を、超短パルスレーザー光で修正した光導波路デバイス。

【図 16】コアの入出力部分にテーパを設けた光導波路デバイス。

【図 17】空孔によるグレーティングを用いた T 字分岐型光導波路デバイス。

【図 18】空孔によるグレーティングを用いた上部反射型光導波路デバイス。

【図 19】凸状表面をゲルとカバーガラスでフラットにして屈折率を修正する方法。

【図 20】 $\text{Ge}$  ドーピング平面導波路に超短パルスレーザー光を走査してチャンネル導波路を形成した光導波路デバイス。

【図 21】導波路型方向性結合器の結合比を超短パルス

21

レーザで調整した光導波路デバイス。

【図 2 2】表面形状を制御して超短パルスレーザ光の導波路コアにおけるエネルギー密度を調整して屈折率を修正した光導波路デバイス。

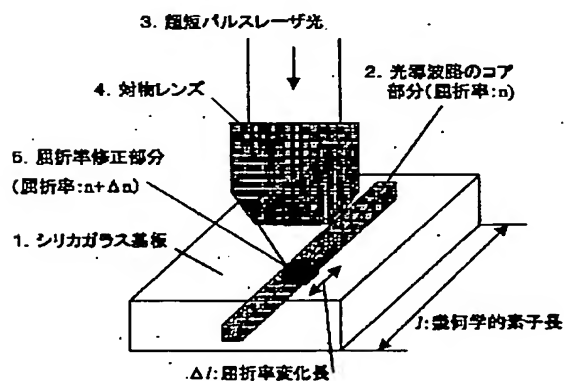
【符号の説明】

1. シリカガラス基板
2. 光導波路のコア部分
3. 超短パルスレーザ
4. 対物レンズ
5. 屈折率修正部分
6. シリカガラスのバンドギャップ
7.  $\text{GeO}_2$  ドープガラスのバンドギャップ
8. シリカガラスの欠陥バンド
9. 価電子帯
10. 超短パルスレーザの光路
11. 50倍の対物レンズで集光した800nmの波長の超短パルスレーザ光
12. 100倍の対物レンズで集光した800nmの波長の超短パルスレーザ光
13. 50倍の対物レンズで集光した266nmの波長の超短パルスレーザ光
14. レーザ光の吸収領域
15. 20倍の対物レンズで集光した800nmの波長の超短パルスレーザ光
16. 3層光導波路デバイス
17. 高密度化により屈折率が変化した光導波路のコア部分
18. 100倍の対物レンズで集光した400nmの波長の超短パルスレーザ光
19. 球状の空孔
20. 20倍の対物レンズで集光した400nmの波長の超短パルスレーザ光
21. 楕円体形状の空孔

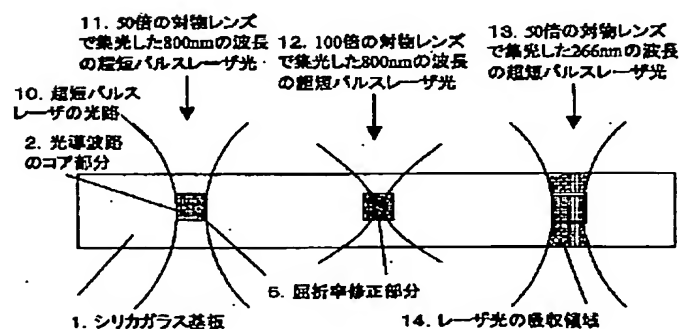
22

22. コア材料のバンドギャップ
23. 超短パルスレーザ照射で生じた欠陥バンド
24. 3光子吸収
25. 3光子吸収で生じた自由電子
26. 欠陥にトラップされた電子
27. 熱処理で緩和した電子
28. 光導波路デバイス
29. X、Y、Z 微動ステージ
30. 30ps以下のパルス光を発生するレーザ発振器
31. 集光光学系
32. 筐体
33. 屈折率修正装置
34. マッハツェンダー干渉型光波長フィルター
35. 光ファイバー
36. 多波長光源
37. 光スペクトルアナライザー
38. ポリマー樹脂薄膜
39. ポリマー光導波路のコア部分
40. シリコン基板
41. シリカガラス薄膜
42. 波長分波用光導波路デバイス
43. 多波長入射光
44. 分派された光
45. 屈折率修正領域
46. 超短パルスレーザで直描した光導波路のコア
47. スポットサイズ変換光導波路の断面
48. グレーティング
49. シリコン樹脂
50. カバーガラス
51. 平面導波路部分
52. 導波路型方向性結合器
53. 主導波路

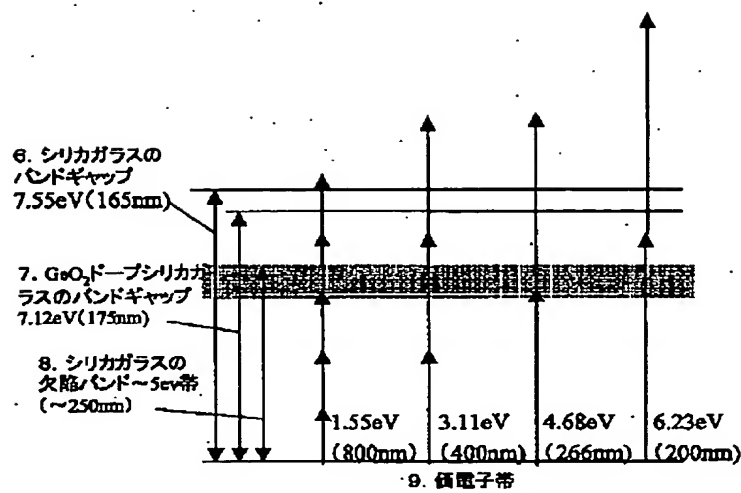
【図 1】



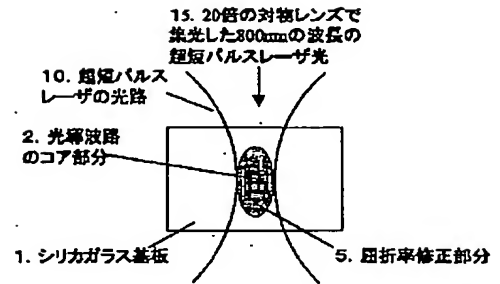
【図 3】



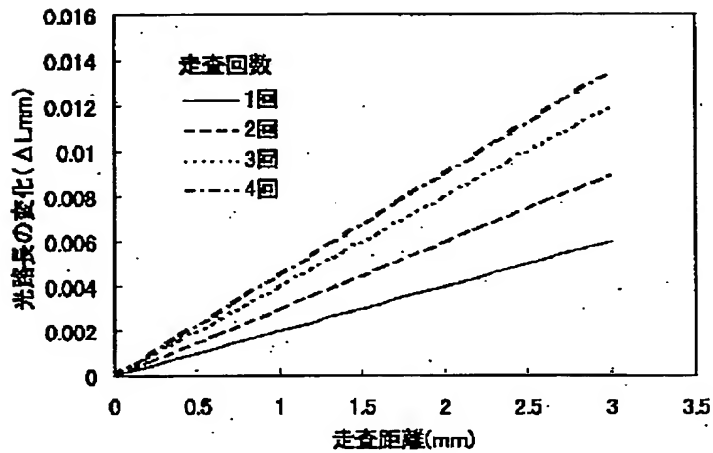
【図 2】



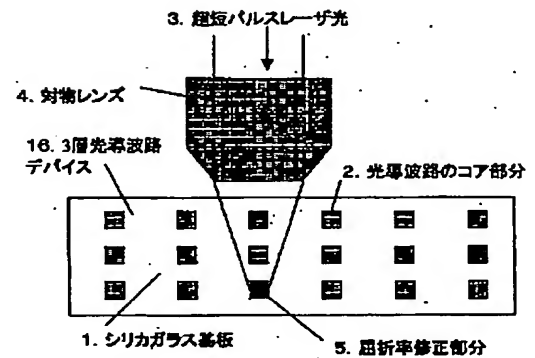
【図 4】



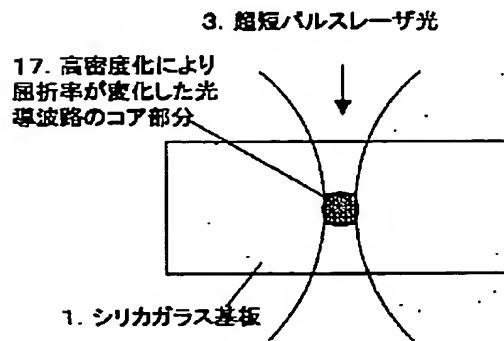
【図 5】



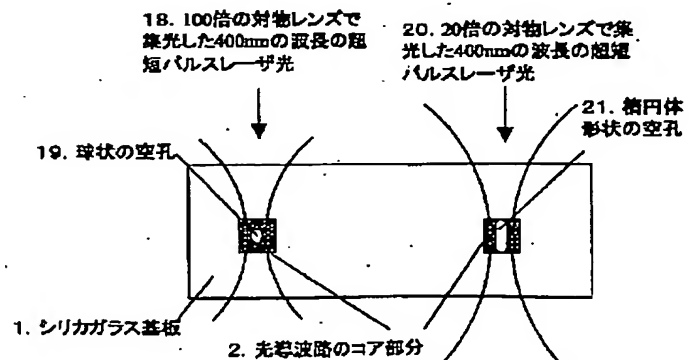
【図 6】



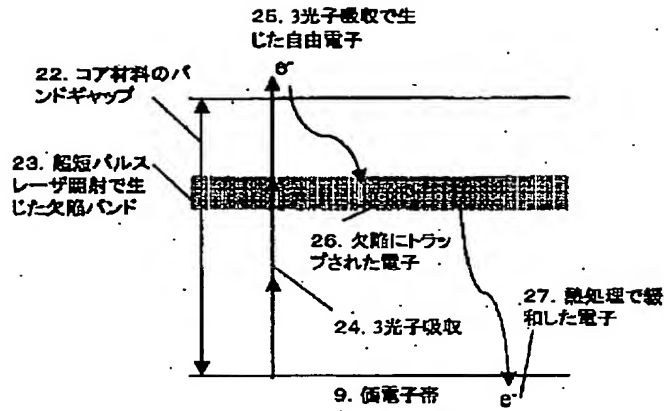
【図 7】



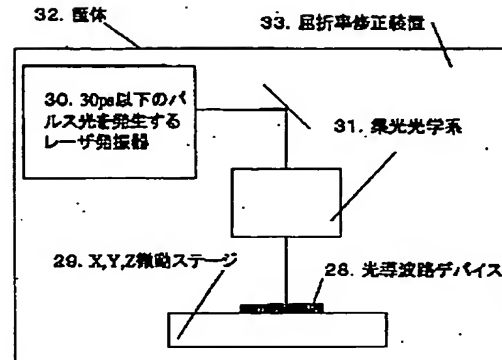
【図 8】



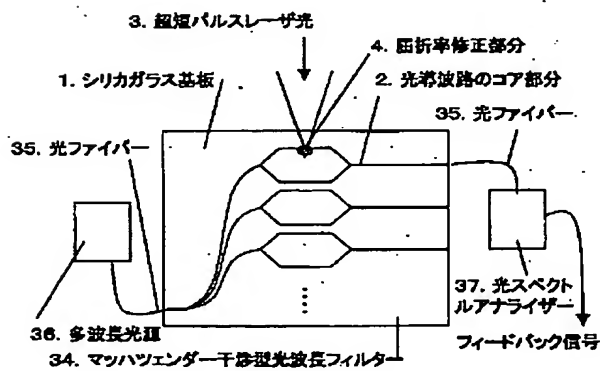
【図 9】



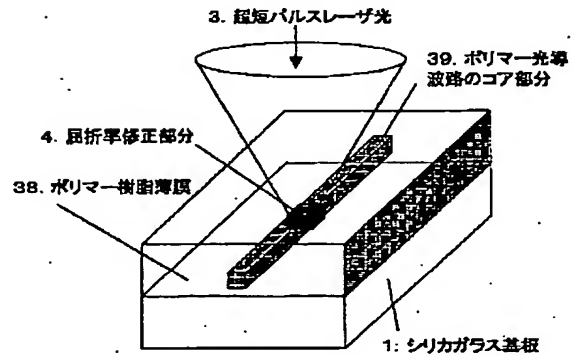
【図 10】



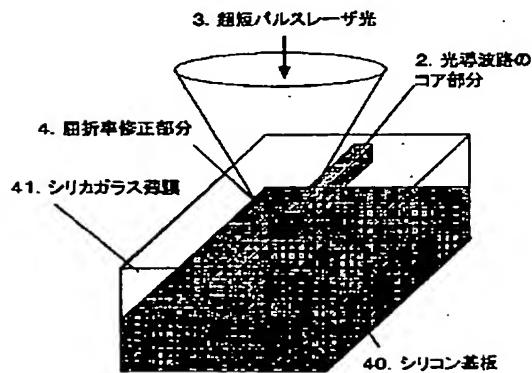
【図 11】



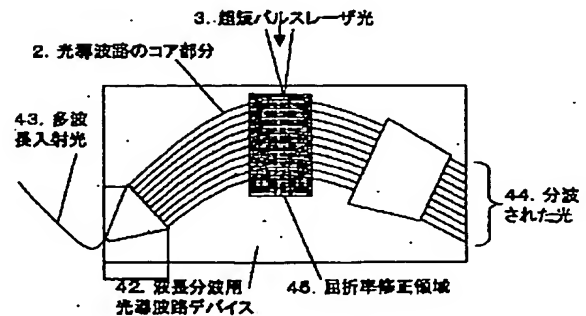
【図 12】



【図 13】

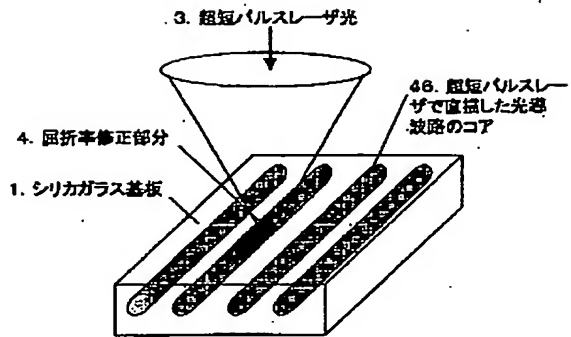


【図 14】

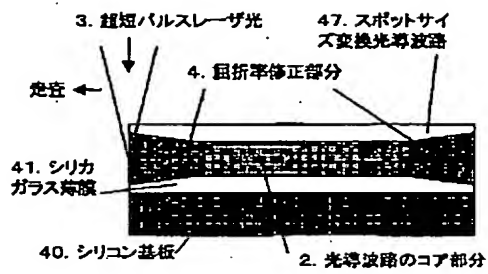




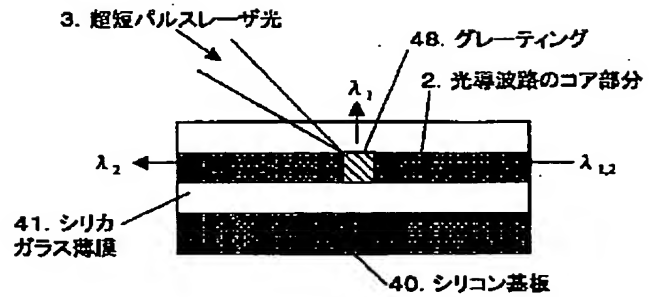
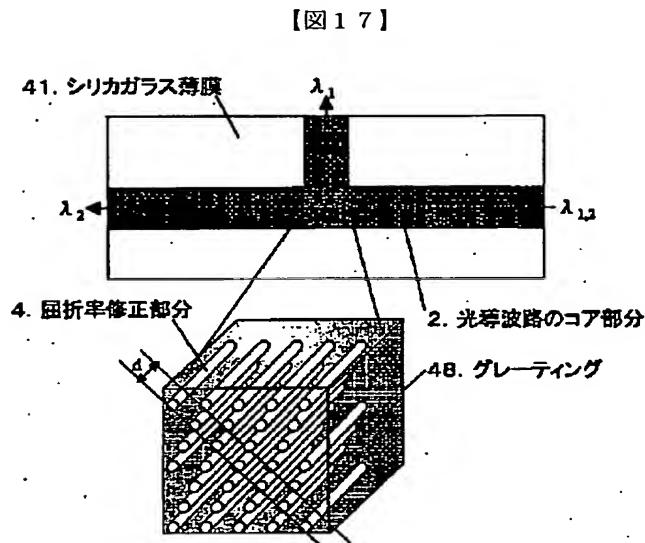
【図 15】



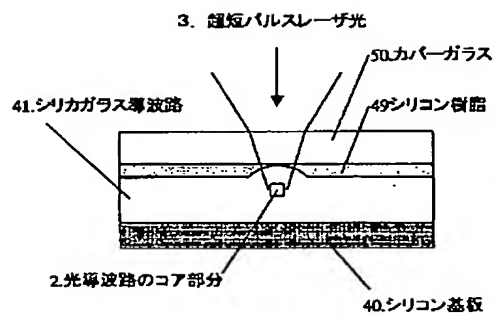
【図 16】



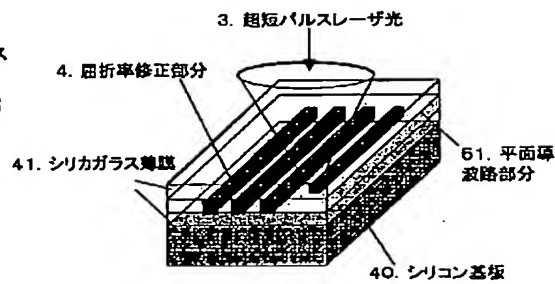
【図 18】



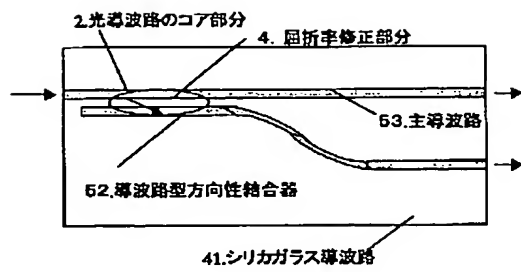
【図 19】



【図 20】



【図 21】



【図 22】

